第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

新疆春季融雪洪水危险性动态评价研究

周 刚[1,2], 崔曼仪[1,2], 李 哲[1,2], 张世强[1,2]
(1. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127;
2. 西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127)

摘 要: 从新疆春季融雪洪水发生的机理出发,选取雪深、高程、水系距离3个评价因子,结合历史灾情数据,利用客观性较高的信息量模型以及GIS技术对新疆春季融雪洪水灾害的危险性开展了定量评价,获取了新疆春季融雪洪水危险性区划图。利用动态致灾因子日正积温和日降水量,驱动静态新疆春季融雪洪水危险性区划,建立了春季融雪洪水危险性动态评价体系,在日尺度上对全疆春季融雪洪水的发生进行了动态评价。结果表明:(1) 新疆春季融雪洪水的高危险区主要分布在北疆的伊犁河谷、博州、中天山北坡、塔城北部和阿勒泰地区。(2) 对新疆伊犁地区2005年3月中上旬的融雪洪水灾害进行动态评价检验发现,融雪洪水危险性动态评价结果精度较高,可应用到全疆的融雪洪水动态评价中。本研究可为新疆春季融雪洪水的防治和水资源管理提供支撑。

关键词: 融雪洪水; 危险性评价; 洪水预测; 信息量模型; 新疆

融雪洪水(snowmelt flood)是指由积雪快速融化形成的洪水,在我国多发于西北地区的春季,每年都会给公路交通、下游水库、渠道等工程设施和人民生命财产的安全等造成损失[1]。在全球升温的大背景下,冰雪融化速度加快、消融期提前,使得融雪洪水汛期和径流峰值出现时间提前[2]、融雪洪水的频次和强度也明显增加[3],其灾害损失变大。新疆作为我国三大主要积雪区之一,融雪洪水的危害巨大。1966年、1971年、1977年、1985年、1993年、2005年、2010年在乌苏、玛纳斯、呼图壁、北疆等地均发生了较严重的融雪洪水灾害。例如,伊犁河谷地区2005年3月中上旬期间,气温迅速回升再加上强降雨过程,积雪快速融化,致使融雪洪水灾害频繁发生。造成新疆伊犁11万人受灾,1.2万多间房屋倒塌,3736头牲畜死亡,毁坏耕地3267 hm^2,农作物受灾面积796 hm^2[4]。对融雪洪水的危险性进行评价是防治和应对融雪洪水的重要基础。

随着3S技术的发展,基于GIS的空间分析与层次分析法、主成分分析、模糊逻辑和专家打分等统计方法相结合的多目标指标评价方法已被广泛应用于洪水灾害的危险性评价研究[5-10]。如唐川等[7]利用层次分析法结合地形坡度、暴雨天数、河网缓冲区、洪峰流量、泥石流分布密度、历史洪灾6项因子进行叠加分析评价,完成了云南红河流域的山洪灾害危险评价图;焦俊超等[8]选取降雨强度、坡度、河网密度、人口密度、植被覆盖和降雨量6个致灾因子利用模糊评判法对青岛崂山区进行洪水危险性评判;王鹏等[9]应用Logistic回归模型计算各评价指标与洪涝灾害发生情况的关联性,对湖北省境内的汉江流域的洪涝灾害进行了危险性区划;李林涛等[10]分别选取3 d降水量、中国气候分区图、坡度图、高程图和河湖缓冲区作为洪水发生的影响因子,并兼顾历史洪水频次数据,采用成因分析法和层次分析法确定因子权重制作了中国洪水危险区划图。

在对融雪洪水的预测和预警方面,往往利用气象因素与融雪洪水发生的相关性,采用气象指标对融雪洪水进行预测预警,或利用水文模型模拟的方法对洪水灾情进行预报预警。如田华等[11]利用1950—2006年的新疆融雪洪水灾情资料对新疆地区融雪洪水发生特点进行分析后发现,平均气温由负转正、最高气温高于5 ℃和升温后有较大降水是融雪洪水预报的关键点;吴素芬等[12]分析了新疆北

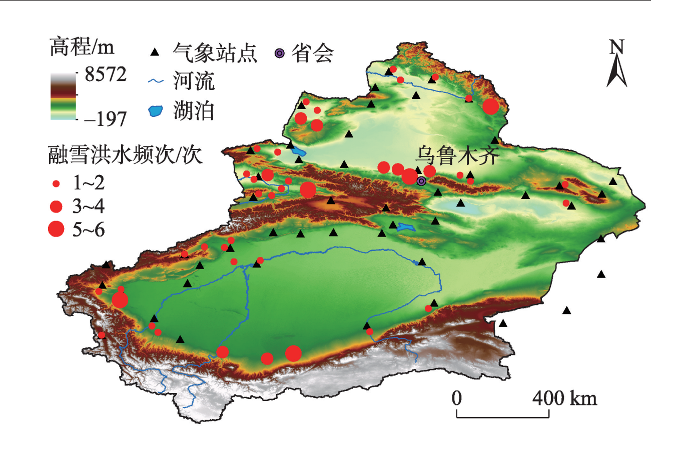
收稿日期: 2021-01-11; **修订日期:** 2021-04-11
基金项目: 国家重大研发计划(2019YFC1510503);国家自然科学基金项目(41730751)
作者简介: 周刚(1997-),男,硕士生,主要从事融雪洪水过程模拟研究. E-mail: zg16397@163.com
通讯作者: 张世强. E-mail: zhangsq@lzb.ac.cn

部地区春季融雪洪水的气候积雪特征,认为出山口站升温幅度达到1.5~2.5 ℃·d⁻¹、持续升温3~6 d、日平均气温达0~5 ℃可作为预报洪水的气温指标;Adamowski[13]利用小波和交叉小波分析分解径流量和气象时间序列数据,实现了融雪洪水提前1~2 d较稳定预报。Chen等[14]以自适应神经模糊推理系统(ANFIS)的方法构建了洪水预报模型,通过分析台湾中部浊水河的降水和径流量数据进行洪水预报;马虹等[15-17]分别应用SRM融雪径流模型对西天山巩乃斯河流域、长江源区冬克玛底河流域和天山中段开都河流域的融雪径流进行了预报;Zhao等[18-22]在天山北坡军塘湖流域构建了一个分布式融雪径流模型,通过耦合大气模式WRF,有效提高了对融雪洪水径流的预见期。这些研究为开展流域融雪洪水危险性动态评价提供了坚实基础。但由于传统的层次分析法和专家打分等方法主观性比较强,难以针对整个新疆的融雪洪水进行危险性评价与区划;另一方面,诸多研究得到的融雪洪水预测的气象指标之间的阈值差异较大,难以在融雪洪水预报中具体应用。融雪水文模型往往侧重于径流的长期模拟,模型的空间参数化较为复杂,难以实现大区域的融雪洪水动态评价。

本文从新疆春季融雪洪水发生的机理出发,选取雪深、高程、水系距离3个评价因子,结合历史灾情数据,利用客观性较高的信息量模型法以及GIS技术对新疆的春季融雪洪水灾害的危险性展开定量评价。进而利用日正积温和日降水量评价静态融雪洪水危险性单元的危险性,从而在日尺度上对全疆春季融雪洪水的发生进行动态评价,为新疆春季融雪洪水精细化预报和干旱区水资源管理提供支撑。

1 研究区概况

新疆总面积1.66×10⁶ km²,由“三山两盆”组成,北有阿尔泰山,南有昆仑山和阿尔金山,天山横亘其中,将新疆分成南北两部分,南有塔里木盆地,北有准噶尔盆地,诸多河流发源于这3条山系中(图1)。新疆积雪水资源量得天独厚,约占到全国积雪水资源总量的1/3[23],季节性冰雪融水是新疆水资源的主要补给,融雪径流对河流的补给量在春季甚至可达到75%以上[24]。由于新疆山区大多山高坡陡,河流集水快,造成山区洪水迅速集中。故而,融雪洪水灾害频发。



注:以审图号为GS(2019)3333号的标准底图制作,底图无修改。下同。

图1 2001—2013年新疆融雪洪水频次及气象站点分布示意图

Fig. 1 The frequency of snowmelt floods and the distribution of meteorological stations in Xinjiang from 2001 to 2013

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 灾情数据 洪水灾情数据采用了新疆2001—2013年融雪型洪水灾情资料,数据来源于2001—2013年防洪、水文简讯以及各地州气象部门的上报与记录,从中整理获取了县域统计单元的新疆融雪洪水发生次数的记录资料。对于融雪洪水的规定如下:1个地区不同县、不同时间各算1次;1个地区不同县、相同时间各算1次。不同地区根据实际发生情况各自统计,本研究中的灾情数据也整合了其他研究[25-26]中的资料。

2.1.2 雪深数据 雪深数据采用“中国0.25°长时间序列雪深数据集(1978—2016年)”,来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/),该数据集基于遥感数据利用Che等[27]在Chang算法基础上针对中国地区进行修正的算法进行雪深反演得到,采用EASE-Grid和地理坐标投影2种投影方式,空间分辨率0.25°,时间分辨率1 d。本研究所利用雪深数据的时间范围为2001—2013年,2月底最大雪深定义为每年2月最后14 d的雪深最大值。

2.1.3 高程数据 高程数据采用SRTM DEM,来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),该数据通过美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘经过2 a

的数据处理后得到。本文所用SRTM DEM V3的空间分辨率90 m,坐标系统为WGS84。

2.1.4 水系数据 水系数据为中国1:1000000水系分布图,来源于资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)。通过ArcGIS软件对5级及以上河流进行3000 m、6000 m、9000 m和14000 m的多环缓冲区分析得到水系距离。

2.1.5 气象数据 气象数据包括新疆及其周边共57个气象站点的日均温和日降水量数据,来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。利用梯度加逆距离平方插值算法(Gradient plus Inverse-Distance-Squared, GIDS)[28-30]对气象站点数据进行空间插值,空间分辨率为3 km×3 km。

2.2 研究方法

2.2.1 危险性评价因子的选取 对区域自然灾害的危险性进行评价通常要考虑孕灾环境、致灾因子等多重因素的影响,很多学者对融雪洪水的主要控制因子进行了相关研究。如王志杰等[31]指出冬季稳定的积雪期积累为春季融雪洪水的发生提供了物质基础;梁春成等[32]把当年最大积雪深度是否大于25 cm作为天山宁家河的融雪洪水的判断标准;俞永旺等[33]指出融雪洪水的形成及河道来水量与初春3月的积雪深度和热力条件有关;吴素芬等[12]研究发现2月底的积雪是产生洪水的物质来源,雪深大于历年雪深10%~40%就有可能发生洪水,持续或急剧升温以及升温后降雨是洪水预报的关键点;沈永平等[34]发现,新疆融雪洪水主要发生在浅山及山前平原和中低山区,浅山及山前平原融雪洪水主要发生在阿尔泰、塔城、伊犁、天山北坡海拔1000 ~ 1500 m以下浅山及山前平原小冲洪沟和坡面上形成的融雪径流,中低山融雪洪水多发于塔城、伊犁、阿尔泰等地的发源于山区的河流中;也有研究指出河流附近发生融雪洪水的可能性较大[7,10]。因此,本研究在分析多个春季融雪洪水成因和灾害影响研究成果基础上,选取出2月底最大雪深、高程、水系距离3个危险性评价因子,进行新疆春季融雪洪水危险性评价,并利用日正积温和日降水量结合融雪洪水危险区划构建了新疆春季融雪洪水危险性的动态评价体系。

2.2.2 信息量模型 信息量模型最早由Yin等[35]提出,该模型通过计算与灾害发生相关的各指标的信息熵(Information Entropy)来确定灾害发生的可能性,该模型对于评价单元较多的情况更具优势[36-41]。在本研究中,融雪洪水受雪深、高程和水系距离3个因子的共同影响,各因子所起作用不同,利用信息量模型可定量计算各影响因子对融雪洪水灾害发生概率的贡献,将这些信息量叠加得到的总信息量作为危险性评价的定量指标。

各影响因子对融雪洪水发生所提供的信息量值根据公式(1)计算:

$$P(X_i) = \ln\frac{R_i/R}{S_i/S} \tag{1}$$

式中:$P(X_i)$是影响因子X_i的信息量值;S是研究区面积;S_i是研究区内含有影响因子X_i的面积;R是研究区内发生融雪洪水的总次数;R_i是影响因子X_i分布区域内已发生融雪洪水的次数。

单个评价单元内的总信息量值根据公式(2)计算:

$$P = \sum_i^n P(X_i) = \sum_i^n \ln\frac{R_i/R}{S_i/S} \tag{2}$$

式中:P为评价单元的总信息量;n为影响因子数。

单元网格内总信息量的值越大代表发生融雪洪水灾害的概率越高,越小则发生灾害概率越低。研究以3 km×3 km的格网为基本评价单元,经过公式(1)计算得到新疆各单元的信息量(表1)。各单元总信息量通过ArcGIS的地图代数相加得到,再利用自然断点法将总信息量重新划分特征类别,即划分为高危险区、中危险区、低危险区、极低危险区4个等级。

2.2.3 动态评价指标体系构建 静态的融雪洪水危险性评价结果旨在反映多年尺度上新疆融雪洪水灾害的平均分布特征,是对历史时期新疆春季融雪洪水灾害空间分布特征的刻画。为使危险性评价结果更好的服务于未来新疆春季融雪型洪水的精细化防治和水资源管理,本研究在危险性评价结果的基础上引入动态致灾因子,即日正积温和日降水量,以驱动静态的新疆春季融雪型洪水危险区划结果(动态评价时所用静态危险区划由日雪深数据评价得到),从而对全疆春季融雪洪水的危险性在日尺度上进行动态评价。

吴素芬等[12]将新疆融雪洪水发生条件确定为气温升温幅度达到1.5~2.5 ℃·d^{-1},持续升温3~6 d,出山口站日平均气温达0~5 ℃。本研究借鉴融雪模型中采用“度日因子”概念[42]描述积雪消融强度对

表1　各危险性评价因子分类及其信息量

Tab. 1　Classification of risk assessment factors and their information

评价因子	分类	灾害占比/%	像元占比/%	信息量
多年平均2月底最大雪深/cm	0~2	13.0	42.4	-1.108
	2~8	9.0	29.4	-1.184
	8~15	22.0	11.2	0.675
	15~22	19.0	8.2	0.840
	22~28	20.0	6.0	1.204
	＞28	17.0	2.8	1.840
高程/m	＜0	0.0	0.1	-∞
	0~500	5.0	4.2	0.174
	500~1000	42.0	17.3	0.887
	1000~1500	44.0	30.0	0.383
	1500~2000	4.0	9.8	-0.896
	2000~2500	2.0	4.7	-0.854
	2500~3000	1.0	7.7	-2.041
	3000~3500	2.0	6.7	-1.21
	＞3500	0.0	19.5	-∞
水系距离/m	0~3000	45.0	9.0	1.609
	3000~6000	15.0	8.4	0.580
	6000~9000	9.0	7.8	0.143
	9000~14000	14.0	11.1	0.232
	＞14000	17.0	63.7	-1.319

该指标进行改进，利用连续3 d正积温的大小来反映气温的连续变化对融雪的影响程度大小，其定义为连续3 d高于0 ℃的日平均气温的总和，具体指标等级如表2所示。为避免无积雪区（如塔克拉玛干沙漠或高温导致的积雪已消融区）高温导致融雪洪水发生的错误判断，利用连续3 d正积温中第1 d的雪深≥1 cm的区域提取有效正积温区。

升温过程中雨夹雪对洪水作用非常明显，降水促进了积雪融化，据计算10 ℃时1 mm雨量中的热量就能从雪层中融化0.125 mm的水[12]，特别是近年来不断增加的春季暴雨引发的雨蚀雪显著加速了消融，从而增加了洪峰流量。如若升温遇上降雨，则极易形成雨雪混合型洪水。目前针对暴雨洪水临界雨量的研究很多[43-45]，但针对新疆春季融雪型洪水临界雨量的研究尚少，尚未得出明确的临界雨量值。本研究采用了新疆气象局划定的新疆降雨量标准，在分析多年（2001—2013年）新疆春季降水量特征的基础上[46-47]，选定小雨、中雨、大雨3个日降雨指标作为动态评价指标（表3）。

通过日正积温和日降水量驱动静态春季融雪洪水危险区划，按照表4指标体系划分预测日的融

表2　升温等级指标的划分

Tab. 2　Classification of heating grade indicators

连续3 d正积温/℃	≤0	0~4	4~6	6~8	＞8
升温等级	1	2	3	4	5

表3　日降雨量指标划分标准

Tab. 3　Standards for dividing daily rainfall indicators

日降水量	小雨	中雨	大雨
新疆24 h雨量量级标准/mm	0~6	6~12	12~24

雪洪水危险等级，从而对融雪洪水发生的危险性进行动态评价。

2.2.4　日均温和日降水量的空间化　新疆春季融雪洪水动态危险性评价是在日尺度上进行的，准确的空间化日正积温和日降水量数据是动态评价结果准确性的保证。GIDS（Gradient plus Inverse-Distance-Squared）插值算法通过对预测网格点附近一组气象站点的数据进行多元线性回归分析，得到气候变量的局部梯度。将经度、纬度、海拔视为自变量，然后从同一台站数据中预测领域目标的气候值，使用多元线性回归系数对每个站位置的差异进行校正，每个观测站对最终估计值的贡献按其与目标点的距离的平方进行逆加权。GIDS插值考虑地理因素（经度、纬度、海拔）的影响，能较为准确地反映气象要素的空间变化。具体计算公式如下：

$$T_0=\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^2}\right]^{-1}\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{1}{d_i^2}\left[T_i+T_{alt,m}(E_0-E_i)+T_{lat,m}(lat_0-lat_i)+T_{lon,m}(lon_0-lon_i)\right]\right\} \tag{3}$$

$$P_0=\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^2}\right]^{-1}\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{P_i}{d_i^2}\left[1+(P_{alt,m}(E_0-E_i)+P_{lat,m}(lat_0-lat_i)+P_{lon,m}(lon_0-lon_i))/P_{i,m}\right]\right\} \tag{4}$$

式中：T_0和P_0是预测网格点的日均温（℃）和降水量（mm）；T_i和P_i分别是第n个邻近气象站的日均温（℃）和降水量（mm）；E_0、lat_0、lon_0分别是预测网格点的平均海拔（m）、纬度（°）、经度（°）；E_i、lat_i、lon_i分别为邻近气象站的海拔（m），纬度（°）、经度（°）；d_i是气象站与预测网格点之间的距离；$P_{i,m}$是计算降水梯度的历史时期内邻近气象站点的月平均降水量；n是相邻站数，本文n设置为3，$T_{alt,m}$（℃·m^{-1}）、$T_{lat,m}$（℃·°$^{-1}$）、$T_{lon,m}$（℃·°$^{-1}$）分别是海拔、纬度、经度的气温梯度；$P_{alt,m}$（℃·m^{-1}）、$P_{lat,m}$（℃·°$^{-1}$）、$P_{lon,m}$（℃·°$^{-1}$）分别是海拔、纬度、经度的降水梯度。

表4 新疆春季融雪洪水危险性动态评价指标

Tab. 4 Dynamic evaluation index of the risk of the spring snowmelt flood in Xinjiang

条件1(静态危险区化)	条件2(动态致灾因子)	危险等级
高危险区(静态)	5级升温伴随大雨	极高危险区(雨雪混合)
	5级升温	极高危险区(升温)
	4级升温伴随大雨	极高危险区(雨雪混合)
	4级升温	极高危险区(升温)
	3级升温	高危险区(升温)
	2级升温	中危险区
	1级升温	低危险区
中危险区(静态)	5级升温伴随大雨	高危险区(雨雪混合)
	5级升温	高危险区(升温)
	4级升温伴随大雨	高危险区(雨雪混合)
	4级升温	高危险区(升温)
	3级升温	中危险区
	2级升温	中危险区
	1级升温	低危险区
低危险区(静态)	5级升温	中危险区
	4级升温	中危险区
	3级升温	极低危险区
	2级升温	极低危险区
	1级升温	极低危险区
极低危险区(静态)	5级升温	极低危险区
	4级升温	极低危险区
	3级升温	极低危险区
	2级升温	极低危险区
	1级升温	极低危险区

3 结果分析

3.1 各危险性评价因子的空间特征

将各危险性评价因子与历史灾情数据(2001—2013年)进行空间分析和统计(图2、图3、图4、表1)发现,新疆多年平均2月底最大雪深分布在0~32.5 cm之间,总体空间分布呈现出北疆多南疆少的特点,其中阿尔泰山脉和天山山脉的高海拔区积雪深度最大。融雪洪水灾害与雪深的空间分布关系整体上呈现灾害频次随着雪深的增加而增加的特征,积雪深度>8 cm的区域的灾害频次占比达到78%;融雪洪水主要发生在500~1500 m高程处,灾害频次占比达到了86%。新疆境内河流数量众多,但流程短,多数发源于山区,整体上西部多于东部,北疆多于南疆。距离水系越近发生融雪洪水的概率就越高,在距离河流14000 m的范围内,灾害占比达

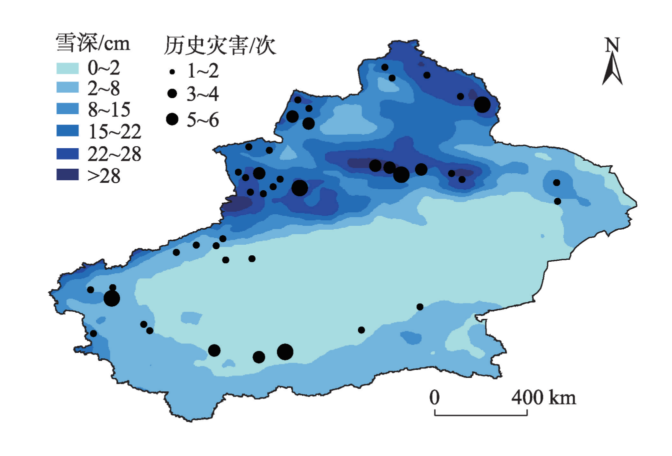


图2 新疆多年平均2月底最大雪深与历史融雪洪水灾害的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of multi-year average maximum snow depth at the end of February and historical snowmelt flood disasters in Xinjiang

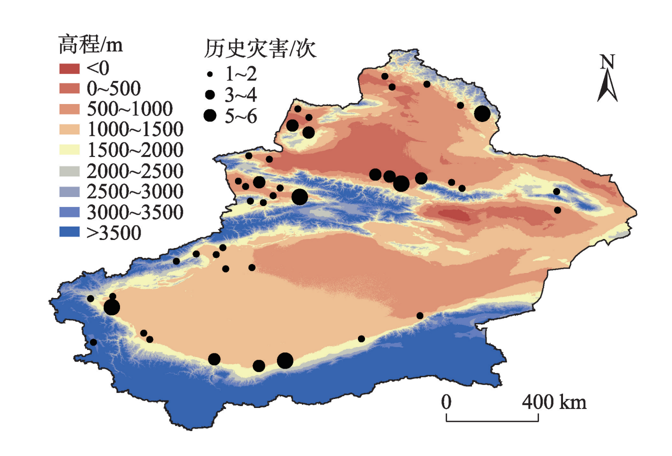


图3 新疆高程与历史融雪洪水灾害的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of elevation and historical snowmelt flood disasters in Xinjiang

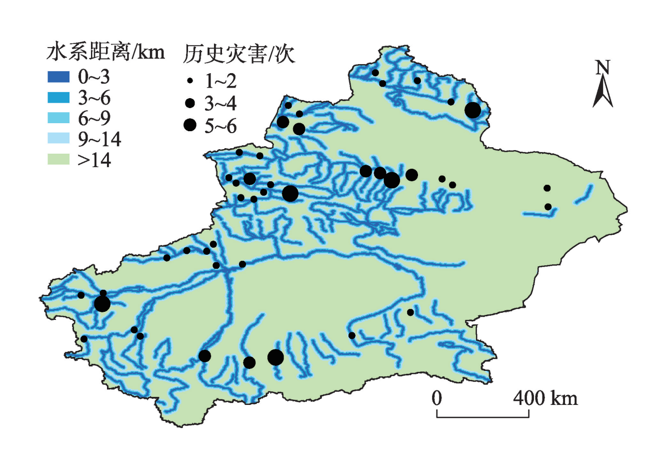


图4 新疆水系距离与历史融雪洪水灾害的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the distance water system and historical snowmelt flood disasters in Xinjiang

83%,尤其河流附近3000 m范围内融雪洪水灾害最为密集,灾害占比为45%。

3.2 新疆春季融雪洪水危险性评价结果

由图5可以看出,新疆春季融雪洪水危险性的空间特征为高危险区主要分布在北疆阿勒泰地区的哈巴河县、布尔津县、阿勒泰市、青河县、福海县北部和富蕴县北部,塔城北部的塔城市、裕民县和额敏县,博州的博乐市、温泉县和精河县,伊犁河谷的霍城县、伊宁县、巩留县、尼克勒县和新源县,中天山北坡的乌苏县、奎屯市、沙湾县、玛纳斯县、石河子市、呼图壁县、吉昌市和乌鲁木齐市。这些城市也是新疆人口较密集、经济较发达的地区,应该重点防治。高危险区的特征包括:主要分布在河谷地区,水系密集,高程较低,地势较缓,利于融雪洪水的迅速汇集,且2月底积雪深度大,为春季融雪洪水的发生提供了充足的物质储备。中危险区除出现于高危险区附近,另有大片中危险区位于准噶尔盆地东部(2月底积雪深度较大),西天山南坡和南疆的喀什市、阿克陶县、乌恰县、和田县境内的众多河流附近也为中危险区;低危险区主要分布在北疆的准噶尔盆地西部(2月底积雪深度较小)和南疆部分地区;极低危险区主要分布在南疆的塔克拉玛干沙漠和海拔大于3500 m的山区。该危险性区划结果与沈永平[48-49]等的研究结果具有高度的一致性。利用历史灾情数据对危险性评价结果进行检验分析(表5)发现,有52%的历史灾害发生在高危险区(面积占比5.6%),30%的历史灾害发生在中危险区(面积占比10.6%),18%的历史灾害发生在低危险区(面积占比30.9%),而极低危险区(面积占比52.9%)在2001—2013年无春季融雪洪水灾害出现,说明危险区划结果与灾害的发生概率有一定的相关关系,本次危险性评价结果能较为客观反映新疆境内的春季融雪洪水危险性的空间分布情况。然而该评价结果也表明单纯采用静态的危险性评价难以反映单次融雪洪水的危险程度和发生概率。

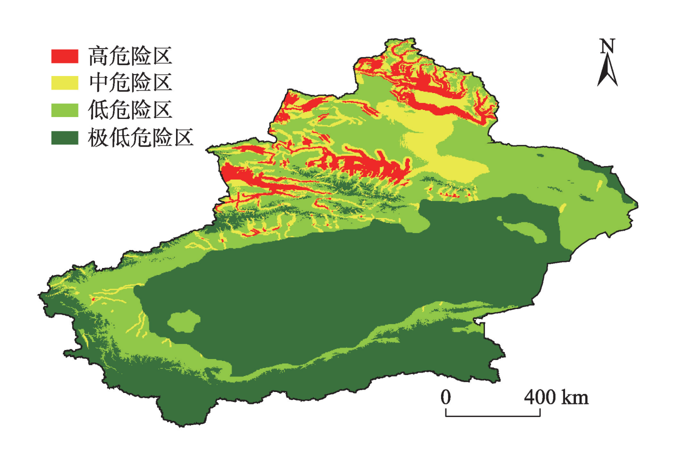


图5　新疆春季融雪洪水危险性区划

Fig. 5　The risk zoning of the spring snowmelt flood in Xinjiang

表5　新疆春季融雪洪水危险性区划统计

Tab. 5　Statistics on the risk zoning of the spring snowmelt flood in Xinjiang

危险性等级	面积/km²	面积占比/%	历史灾害频次	灾害频次占比/%
高危险区	91181	5.6	52	52
中危险区	173393	10.6	30	30
低危险区	505318	30.9	18	18
极低危险区	864270	52.9	0	0

3.3 新疆春季融雪洪水危险性动态评价检验

1985年、1988年、2005年在新疆发生了3次面积大、影响广的融雪洪水,给下游造成了重大经济损失。本文选取2005年3月中上旬发生在新疆的大型融雪洪水进行检验。2005年3月中上旬新疆春季融雪洪水事件过程如下[4,12]:2005年2月底,北疆气温较往年均值更低,积雪厚度比往年均值深约10%~40%。3月1—11日,伊犁地区、塔城北部、天山北坡多地持续升温,升温幅度0.7~3.2 ℃·d^{-1},连续升温日数4~12 d。3月5—8日伊犁地区和塔城北部发生融雪洪水,3月7—10日天山北坡出现融雪洪水,3月12—13日伊犁地区出现了1次大降水,降水范围大,使得中山带积雪一并融化,增加了洪峰流量,形成灾害更强的雨雪混合型洪水。

根据此次新疆融雪洪水发生的重要时间节点,本研究分别对新疆3月2日、3月5日、3月8日、3月10日、3月12日、3月14日的融雪洪水危险性进行了动态评价(图6)。

3月2日(图6a),由于整体气温较低,全疆基本处于极低和低危险区,西天山南坡的托什干河、库玛拉河、台兰河和木扎尔特河的部分河段出现高危险区,东天山南坡的吐鲁番市高昌区内部分河流附近出现高危险区,伊犁地区的伊宁市及其周边开始出现中危险区。

3月5日(图6b),沿伊犁河谷的可克达拉市、霍城县、伊宁市、察布查尔锡自治县、伊宁县、巩留县

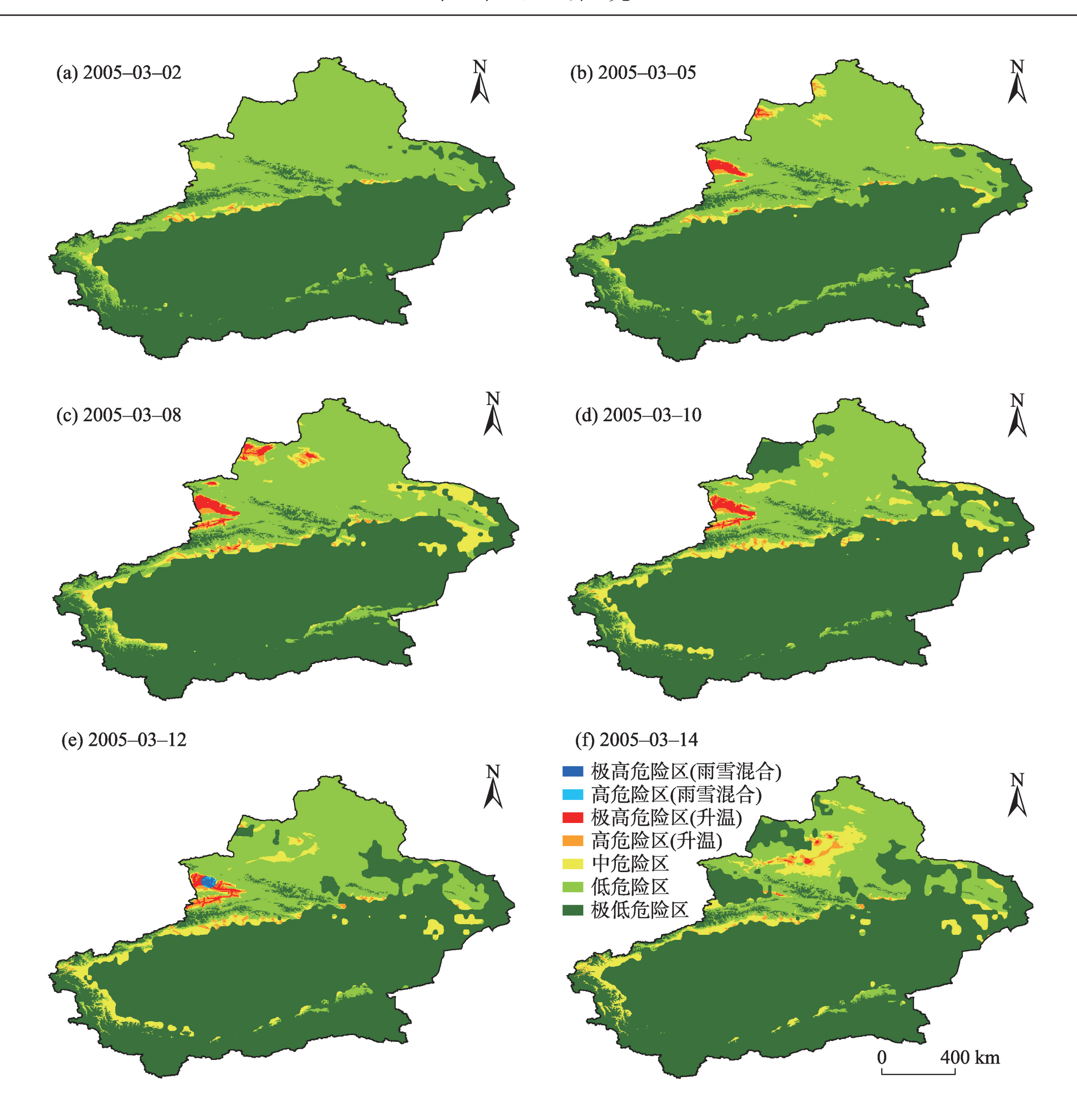


图6 2005年3月中上旬新疆春季融雪洪水危险性区划

Fig. 6 The risk zoning of the spring snowmelt flood in Xinjiang in mid-to-early March 2005

出现连片的极高危险区,特克斯县的伊犁河河段及其周边也出现极高危险区。塔城地区北部的塔城市出现大片高危险区,其中塔城市境内的额敏河及其支流附近开始出现极高危险区。阿勒泰地区的哈巴河县南部的额尔齐斯河附近出现极高和高危险区,和布克赛尔蒙古自治县境内出现了小部分高危险区。

3月8日(图6c),伊犁河谷的极高危险区进一步沿河谷向东边的新源县延伸,位于特克斯县和昭苏县的伊犁河河段附近出现连片的极高和高危险区。塔城市的极高危险区沿额敏河由西向东边的额敏县显著扩张。博州的温泉县开始出现大片极高危险区。哈巴河县境内的极高和高危险区消失,降为低危险区域。和布克赛尔蒙古自治县境内的高危险区以和布克河下游为中心进一步扩张,出现大片的极高危险区。西天山南坡的拜城县境内众多河流附近的极高危险区也出现扩张。

3月10日(图6d),伊犁河谷的极高危险区仍持续不减。但塔城北部与和布克赛尔蒙古自治县境内的极高和高危险区全部消失,由雪深数据分析知,3月8日这两地的积雪已基本完全消融,故而降为极低危险区域。博州的温泉县极高危区降为高危区,西天山南坡的拜城县境内众多河流附近的极高危险区也出现消退。

3月12日(图6e),伊犁河谷的极高危险区整体开始消退,极高危险区的范围明显缩小,但在局部

地区伊宁市及其周边又出现了强降雨,造成了该地区又出现了雨雪混合融雪洪水极高危险区。博州的温泉县高危区消失。

3月14日(图6f),由于连日的持续升温以及3月12日的强降雨加速了伊犁地区积雪的消融,由3月12日雪深数据分析得知伊犁地区的积雪已基本完全消融,该区极高危险性解除,伊犁河谷持续多日的融雪洪水结束。乌苏县、克拉玛依区、沙湾县、玛纳斯县出现小部分极高和高危险区。

整体上看,在此次融雪洪水灾害动态评价中,伊犁河谷地区的危险性最高,该区融雪洪水灾害约始于3月5日,终于3月14日,该区3月2日未发生融雪洪水是由于气温过低,3月14日融雪洪水结束是因为积雪基本完全消融。其次危险性较高的是塔城北部(始于3月5日,3月8日达到顶峰,3月10日结束)与温泉县(始于3月8日,结束于3月12日)以及和布克赛尔蒙古自治县(始于3月5日,结束于3月10日),最后危险性较低的是西天山南坡部分河流。动态评价的融雪洪水危险性过程与实际情况基本相符,说明本研究在全疆尺度上对新疆春季融雪洪水危险性的动态评价具有可行性。

4 讨 论

(1) 结合历史灾情数据利用信息量模型法对新疆春季融雪洪水的危险性进行了动态评价,客观性较高,结果与实际也基本相符。但是,在进行动态危险性评价时,驱动数据(日雪深、日气温、日降水量)的参数化方案的不确定性会导致评价结果出现一定偏差。另外,在构建动态评价指标体系时主观性较强,不同的评价指标会导致评价结果存在一定程度的差异。后续的研究可以使用高精度的气象产品来进行试验,同时也可以使用融雪径流模型对预测的极高危险区和高危险区同步模拟融雪洪水过程[50],从而实现更为准确的洪水过程估计。

(2) 主要针对新疆春季升温型融雪洪水开展了动态危险性评价,对于新疆雨雪混合型洪水的动态评价只做了简单的尝试,本文将强降雨和升温进行简单的叠加规定为雨雪混合型洪水,主要为了区别出升温和强降雨混合的这类融雪洪水。后续可以对雨蚀雪的机理展开进一步研究,为雨雪混合型洪水制定危险等级划分指标,对其开展更为准确的危险性评价。

5 结 论

通过研究新疆春季融雪洪水的形成机制,构建了基于危险性评价因子分析选取→因子权重确定→春季融雪洪水危险性区划→动态评价指标体系建立→春季融雪洪水动态评价的方法,从而获取了新疆春季融雪洪水危险性区划图,并实现了新疆春季融雪洪水危险性在日尺度上的动态评价。主要结论如下:

(1) 新疆春季融雪性洪水的高危险区主要分布在北疆的伊犁河谷、博州、中天山北坡、塔城北部和阿勒泰地区。高危险区的特征为:主要沿河流分布在河谷地区,水系密集,高程较低,地势较缓,且2月底积雪深度大;中危险区出现于高危险区附近,另有大片中危险区位于准噶尔盆地东部,以及西天山南坡和南疆的喀什市、阿克陶县、乌恰县、和田县境内的众多河流附近;南疆主要为极低危险区和低危险区;危险性评价结果能客观反映新疆境内的春季融雪洪水危险性的空间分布情况。

(2) 通过动态致灾因子日正积温和日降水量驱动日尺度上的静态春季融雪洪水危险性区划,对2005年3月中上旬发生在新疆的春季融雪洪水进行了检验,计算的危险性动态评价结果与实际情况基本相符,本方法可为新疆春季融雪洪水精细化预报和干旱区水资源管理提供支撑。

参考文献(References):

[1] 杨金明, 李诚志, 房世峰, 等. 新疆地区季节性融雪洪水模拟与预报研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(1): 80-88. [Yang Jinming, Li Chengzhi, Fang Shifeng, et al. A review of seasonal snow-melt flood simulation and forecast in Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2019, 36(1): 80-88.]

[2] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295-1304.]

[3] 王辉. 融雪性洪水三维可视化系统研究与应用[D]. 石河子: 石河子大学, 2016. [Wang Hui. Study on Three-dimensional Visualization of Snowmelt Flood[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.]

[4] 房世峰. 新疆融雪径流预报及其不确定性研究[D]. 乌鲁木齐:

新疆大学, 2010. [Fang Shifeng. A Study on Snowmelt Runoff Forecasting and Its Uncertainty Analysis in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2010.]

[5] 李琼. 洪水灾害风险分析与评价方法的研究及改进[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. [Li Qiong. The Research and Improvement of Risk Analysis and Evaluation Method on Flood Disaster[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.]

[6] 陈伟. 山区村镇滑坡灾害风险评估研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. [Chen Wei. Study on Landslide Risk Assessment in Mountainous Villages and Towns[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.]

[7] 唐川, 朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 87−94. [Tang Chuan, Zhu Jing. A GIS based regional torrent risk zonation[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 87−94.]

[8] 焦俊超, 马安青, 李福建. 基于GIS的崂山区洪水危险等级模糊评判研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(5): 161−164. [Jiao Junchao, Ma Anqin, Li Fujian. Fuzzy evaluation of flood risk rating in Laoshan district based on GIS[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(5): 161−164.]

[9] 王鹏, 邓红卫. 基于GIS和Logistic回归模型的洪涝灾害区划研究[J]. 地球科学进展, 2020, 35(10): 1064−1072. [Wang Peng, Deng Hongwei. Study on flood hazard risk zoning based on GIS and logistic regression model[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(10): 1064−1072.]

[10] 李林涛, 徐宗学, 庞博, 等. 中国洪灾风险区划研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 22−30. [Li Lintao, Xu Zongxue, Pang Bo, et al. Flood risk zoning in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 22−30.]

[11] 田华, 杨晓丹, 张国平, 等. 2009年3月中旬新疆融雪型洪水气象成因分析[J]. 气象, 2011, 37(5): 590−598. [Tian Hua, Yang Xiaodan, Zhang Guoping, et al. The possible weather causes for snowmelt flooding in Xinjiang in Mid-March 2009[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(5): 590−598.]

[12] 吴素芬, 刘志辉, 邱建华. 北疆地区融雪洪水及其前期气候积雪特征分析[J]. 水文, 2006, 26(6): 90−93. [Wu Sufen, Liu Zhihui, Qiu Jianhua. Analysis of the characteristics of snowmelt flood and previous climate snow condition in North Xinjiang[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(6): 90−93.]

[13] Adamowski J F. Development of a short-term river flood forecasting method for snowmelt driven floods based on wavelet and cross-wavelet analysis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 353(3): 247−266.

[14] Chen S H, Lin Y H, Chang L C, et al. The strategy of building a flood forecast model by neuro-fuzzy network[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(7): 1525−1540.

[15] 马虹, 程国栋. SRM融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用实验[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2088−2093. [Ma Hong, Cheng Guodong. Application experiment of SRM snowmelt runoff model in Gongnaisi River Basin of west Tianshan[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2088−2093.]

[16] 刘俊峰, 杨建平, 陈仁升, 等. SRM融雪径流模型在长江源区冬克玛底河流域的应用[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1149−1159. [Liu Junfeng, Yang Jianping, Chen Rensheng, et al. The simulation of snowmelt runoff model in the Dongkemadi River Basin, headwater of the Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11): 1149−1159.]

[17] 李兰海, 尚明, 张敏生, 等. APHRODITE降水数据驱动的融雪径流模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 53−59. [Li Lanhai, Shang Ming, Zhang Minsheng, et al. Snowmelt runoff simulation driven by APHRODITE precipitation dataset[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 53−59.]

[18] Zhao Q D, Liu Z H, Ye B S, et al. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(10): 1897−1906.

[19] 乔鹏, 秦艳, 刘志辉. 基于能量平衡的分布式融雪径流模型[J]. 水文, 2011, 31(3): 22−26, 35. [Qiao Peng, Qin Yan, Liu Zhihui. A spatially distributed snowmelt model based on energy balance[J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(3): 22−26, 35.]

[20] 闫彦, 刘志辉, 叶朝霞. 新疆北疆地区融雪洪水灾害预警模型的建立与验证[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 552−557. [Yan Yan, Liu Zhihui, Ye Zhaoxia. Establishment and validation of early-warning model for snowmelt flood in North Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 552−557.]

[21] Fang S F, Xu L D, Pei H, et al. An integrated approach to snowmelt flood forecasting in water resource management[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 548−558.

[22] Fang S F, Xu L D, Zhu Y Q, et al. An integrated information system for snowmelt flood early-warning based on internet of things[J]. Information Systems Frontiers, 2015, 27(2): 321−335.

[23] 李培基. 中国季节积雪资源的初步评价[J]. 地理学报, 1988, 43(2): 108−119. [Li Peiji. Preliminary evaluation of seasonal snow resources of China[J]. Acta Geographica Sinica, 1988, 43(2): 108−119.]

[24] 王建, 李文君. 中国西部大尺度流域建立分带式融雪径流模拟模型[J]. 冰川冻土, 1999, 21(3): 264−268. [Wang Jian, Li Wenjun. Establishing simulated model of snowmelt runoff for large scale basin in Western China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(3): 264−268.]

[25] 阿不力米提江·阿布力克木, 陈春艳, 玉素甫·阿不都拉, 等. 2001−2012年新疆融雪型洪水时空分布特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 226−232. [Ablimitjan Ablikim, Chen Chunyan, Yusup Abdula, et al. The temporal and spatial distribution features of snowmelt flood events in Xinjiang from 2001 to 2012[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(1): 226−232.]

[26] 刘鑫, 赵鲁强, 杨静, 等. 新疆春季融雪型洪水分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(30): 165−168. [Liu Xin, Zhao Luqiang, Yang Jing, et al. Study on distribution features of spring snowmelt flooding in Xinjiang[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(30): 165−168.]

[27] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008,

49(1): 145−154.

[28] Zhao Q D, Ding Y J, Wang J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 60−81.

[29] Price D T, Mckenney D W, Nalder I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2000, 101(2−3): 81−94.

[30] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47−56. [Lin Zhonghui, Mo Xinguo, Li Hongxuan, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China[J]. Acta Geographica Sinica. 2002, 57(1): 47−56.]

[31] 王志杰, 迪里木拉提, 李从林. 天山北麓低山丘陵地区春季融雪洪水的研究——以三工河古河道为例[J]. 干旱区地理, 2002, 25(4): 302−308. [Wang Zhijie, Dilimulati, Li Conglin. Study on the spring floods caused by snow melt water in low-mountain and hill regions of northern piedmont of the Tianshan Mountains: A case study in the paleochannels of Sangong River[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(4): 302−308.]

[32] 梁春成, 杨乃康, 陈亚宁. 天山宁家河春季融雪洪水成因初探[J]. 干旱区地理, 1993, 16(3): 75−79. [Liang Chuncheng, Yang Naikang, Chen Yaning. A preliminary study on snowmelt flood of Ninjia River, Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(3): 75−79.]

[33] 俞永旺, 徐冰, 白东明, 等. 天山北坡雀尔沟河春季融雪洪水的成因分析[J]. 干旱区研究, 1995, 12(3): 15−20. [Yu Yongwang, Xu Bing, Bai Dongming, et al. Analysis on the cause of spring melted snow flood in Qiurgou River[J]. Arid Zone Research, 1995, 12(3): 15−20.]

[34] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1355−1370. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(II): Hazards Effects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1355−1370.]

[35] Yin K L. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks[C]// Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 1988.

[36] 黄润秋, 徐向宁, 唐川, 等. 地质环境评价与地质灾害管理[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 151−179. [Huang Runqiu, Xu Xiangning, Tang Chuan, et al. Geological Environment Assessment and Geological Disaster Management[M]. Beijing: Science Press, 2008: 151−179.]

[37] Vijith H, Madhu G. Application of gis and frequency ratio model in mapping the potential surface failure sites in the poonjar subwatershed of meenachil river in western ghats of kerala[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2007, 35(3): 275−285.

[38] Akbar T A, Ha S R. Landslide hazard zoning along Himalayan Kaghan Valley of Pakistan by integration of GPS, GIS, and remote sensing technology[J]. Landslides, 2011, 8(4): 527−540.

[39] 孟庆华, 孙炜锋, 王涛. 陕西凤县滑坡易发性评价研究[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(2): 136−145. [Meng Qinghua, Sun Weifeng, Wang Tao. Study on the landslide susceptibility assessment in Feng County, Shaanxi Province[J]. Geological Survey and Research, 2013, 36(2): 136−145.]

[40] Lee M J, Park I, Won J S, et al. Landslide hazard mapping considering rainfall probability in Inje, Korea[J]. Geomatics Natural Hazards and Risk, 2016, 7(1): 424−446.

[41] 刘鑫, 赵鲁强, 刘娜, 等. 伊犁河流域春季融雪型洪水危险性评价与区划[J]. 气象科技进展, 2016, 6(6): 35−41. [Liu Xin, Zhao Luqiang, Liu Na, et al. Risk evaluation of the spring snowmelt flood in river basin and it's mapping[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(6): 35−41.]

[42] Marinec J, Rango A. Parameter values for snowmelt runoff modeling[J]. Journal of Hydrology, 1986, 84(3−4): 197−219.

[43] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 901−908. [Cheng Weishuai. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 901−908.]

[44] 闫宝伟, 刘昱, 江慧宁, 等. 考虑降雨空间异质性的动态临界雨量预警指标推求[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 342−348. [Yan Baowei, Liu Yu, Jiang Huining, et al. Study on dynamic critical rainfall warning index considering spatial heterogeneity of rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 342−348.]

[45] 张世才, 褚建华, 张同泽. 祁连山区山洪灾害临界雨量计算和风险区划分[J]. 水土保持学报, 2007(5): 196−200. [Zhang Shicai, Chu Jianhua, Zhang Tongze. Calculation of critical rainfall amounts and risk area partition of flood disaster in QiLian Mountain Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007(5): 196−200.]

[46] 江远安, 刘精, 邵伟玲, 等. 1961−2013年新疆不同时间尺度降水量的气候特征及其历史演变规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1363−1375. [Jiang Yuanan, Liu Jing, Shao Weiling, et al. Climatic characteristics and historical evolution of precipitation in different time scales in Xinjiang from 1961 to 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1363−1375.]

[47] 郑宁, 刘琼, 黄观, 等. 新疆三大山区可降水量时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 77−84. [Zheng Ning, Liu Qiong, Huang Guan, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of total precipitable water vapor in three mountain areas of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 77−84.]

[48] 沈永平. 冰雪灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 1−200. [Shen Yongping. Snow Disaster[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 1−200.]

[49] 张俊兰, 罗继, 王荣梅. 近20 a新疆升温融雪(冰)型洪水频次时空变化及大气环流型分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 339−

350. [Zhang Junlan, Luo Ji, Wang Rongmei. Combined analysis of the spatiotemporal variations in snowmelt(ice) flood frequency in Xinjiang over 20 years and atmospheric circulation patterns[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 339−350.]

[50] 曾子悦, 许继军, 王永强. 基于遥感空间信息的洪水风险识别与动态模拟研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 463−472. [Zeng Ziyue, Xu Jijun, Wang Yongqiang. Advances in flood risk identification and dynamic modelling based on remote sensing spatial information[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 463−472.]

Dynamic evaluation of the risk of the spring snowmelt flood in Xinjiang

ZHOU Gang[1,2], CUI Manyi[1,2], LI Zhe[1,2], ZHANG Shiqiang[1,2]

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Xinjiang is an area with abundant snow and frequent snowmelt floods. In the context of global climate change, the frequency of flood disasters in Xinjiang, especially snowmelt floods, has increased, and flood losses have increased. Based on the mechanism of the spring snowmelt flood in Xinjiang, this study investigates snow depth, elevation, and water system distance, combined with historical disaster data, and uses an objective information model and geographical information system technology on the risk of Xinjiang spring snowmelt flood disasters. A quantitative evaluation was conducted, and a zoning map of the risk of snowmelt flood in Xinjiang in spring was obtained. Furthermore, the dynamic hazard factors of daily positive accumulated temperature and daily precipitation were used to determine static Xinjiang spring snowmelt flood risk zoning, and a dynamic evaluation system of spring snowmelt flood risk was established, which dynamically analyzes the daily occurrence of spring snowmelt floods in Xinjiang. We found that the high-risk areas of spring snowmelt floods in Xinjiang are primarily distributed in the Ili River Valley, Bozhou, the northern slope of the middle Tianshan Mountain, the northern part of Tacheng, and the Altay region in northern Xinjiang. Additionally, the dynamic evaluation test of the snowmelt flood disaster in the Ili area of Xinjiang in mid-to-early March 2005 found that the accuracy of the dynamic evaluation result of the snowmelt flood risk was high, and it can be applied to the dynamic evaluation of snowmelt floods in Xinjiang. This study provides support for the prevention and control of spring snowmelt floods and water resource management in Xinjiang.

Keywords: snowmelt flood; risk assessment; flood forecast; information model; Xinjiang